干旱胁迫对欧李幼苗表型可塑性的影响

段娜[1,2]，徐军[1]，陈海玲[1]，高君亮[1]，刘禹廷[1]，贾玉奎[1*]

（1. 国家林业局内蒙古磴口荒漠生态系统定位观测研究站/中国林业科学研究院沙漠林业实验中心，内蒙古磴口 015200；2. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院，呼和浩特 010010）

摘要：为探讨干旱胁迫对欧李表型可塑性的影响，本实验以欧李为实验材料，通过干旱胁迫处理，对欧李的形态特性、生长特性等方面进行研究。结果表明，随着干旱胁迫的加剧，欧李根生物量、枝叶生物量、植株总生物量积累、根冠比和根冠比胁迫指数均呈现先升高后降低的趋势，在 T1 处理下达到最大值，并显著高于其他处理（α =0.05）。随土壤含水量的降低，欧李根的生物量分配指数呈先增加后降低的趋势，叶生物量与之相反，在 T1 处理下根的生物量分配指数最大，枝叶的最小（α =0.05）。在水分供应为 60%-80%时，欧李的株高、冠幅、基径、二级分枝数、主根长、主根直径及侧根数量均达到最大值（α =0.05），对一级分枝数的生长没有显著影响。随着水分胁迫的加剧，叶片长从 T2 处理开始下降，叶片宽、单片叶面积及比叶面积均呈先增加后减少的趋势（α =0.05）。综上可得，欧李通过调整形态特性、各器官生物量及累及其分配对不同干旱胁迫条件产生较强的可塑性。

关键词：欧李，干旱胁迫，表型可塑性

DOI：10.11931/guihaia.gxzw201803029

Effects of drought stress on phenotypic plasticity of *Cerasus humilis*

DUAN Na[1,2]，XU Jun[1]，CHEN Hailing[1]，GAO Junliang[1]，LIU Yuting[1]，JIA Yukui[1*]

(1.*Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem Research Station*, *State Forestry Administration /Desert Forestry Experiment Center*，*Chinese Academy of Forestry*，Dengkou 015200，Inner Mongolia，China；
2.*Desert Science and Engineering College*，*Inner Mongolia Agricultural University*，Hohhot 010010，China)

Abstract: In order to study the Phenotypic Plasticity of *Cerasus humilis,* under the different drought srtess， the growth characteristics and morphology characteristics of *Cerasus humilis* were studied. The main results are as follows: Under drought stress condition, the growth characteristics of *Cerasus humilis* was significantly affected. With the increase of drought stress, the biomass, leaf biomass, total biomass accumulation, root - to - root ratio and root - to - shoot stress ratio showed thereased then decreased trend, and reached the maximum, under T1 treatment which was significantly higher than other treatments. With the decrease of soil water content, the biomass distribution index of *Cerasus humilis* increased first and then decreased. On the contrary, the biomass distribution index of root and leaf was the smallest under T1 treatment.Under drought stress, the morphological characteristics of eraser were significantly affected. When the water supply was between 60% and 80%, the plant height, crown width, diameter, secondary branch number, main root length, root diameter and lateral root number of *Cerasus humilis* were the highest, and there was no significant effect on the growth of primary branches. With the increase of drought stress, leaf length decreased from T2 treatment, leaf width, leaf area and leaf area increased first and then decreased. Therefore, the Phenotypic Plasticity of adjusted the morphological characteristics and the distribution of organ biomass were grater under the different drought stress.

收稿日期： 2018-07-09

基金项目：国家林业局公益性行业科研专项（201504710）；国家"十三五"重点研发计划（2016YFC0500904）[State Forestry Administration, Commonweal Special Industry Research （201504710）；Supported by National Key Research and Development Program of China in the 13th Five-Year Plan（2016YFC0500904）]。

作者简介：段娜（1986-），女，博士在读，工程师，研究方向为植物生理，（E-mail）15149816558@163.com。
通讯作者：贾玉奎，高级工程师，研究方向为林学，（E-mail）slzxjia@126.com。

Key words: *Cerasus humilis*, drought stress, phenotypic plasticity

植物在生长发育过程中会受到不同环境条件的作用，同时会产生相应的表型来适应环境异质条件，植物具备的这一能力称为表型可塑性（Pigliucci，2005；Sultan，2000）。植物的表型可塑性由植物的形态可塑性、生理及生态可塑性组成（De Kroon et al，2005），通常情况下植物通过其表型可塑性在异质环境中调节自身的生理生态或形态特征，完成资源的利用和分配，从而适应当地生存条件（Zhu，2007）。20 世纪 90 年代我国学者开始系统研究植物表型可塑性，主要集中在异质性较大的非生物因子方面，例如温度、水分、光照及营养等（Schlichting，1986；王林龙，2015；乐也，2015），且由早期简单的形态描述过渡到现在各器官生物量的积累和分配的研究以及生理生态等方面的研究（徐军，2017；庞世龙，2017；王永秋，2016）。水分是植物生长发育不可或缺的因素之一，水分的增加或减少均会影响植物的正常生长，因此在植物生理生态研究领域中水分与植物表型可塑性的响应关系已成为研究热点（张刚，2014）。

欧李（*Cerasus humilis*），蔷薇科樱属小灌木，中国独有的特殊沙生药用植物，植株矮小但根系发达，根孽更新能力强，具有抗寒、耐旱、耐瘠薄、适应性强的特性，是我国西北干旱地区退耕还林的先锋树种。欧李果实是第三代功能小水果，具有较高的营养价值和经济价值，是生态与经济效益相结合的典范，因此近年来欧李的研究被越来越多的学者所关注，使得欧李的研究向着更广泛、更深层次、更高水平的方向稳步前进，例如抗旱机理（朱荣杰，2006）、繁殖育种（张立彬，1995）、果实营养、药用价值、以及分子生物学等方面的研究（李欧，2010；张建成，2011）均取得了显著成果。但是，有关欧李在干旱胁迫下表型可塑性等方面的研究未见报道。因此，本研究在控制土壤水分含量条件下，研究干旱胁迫对欧李生长和形态可塑性的影响，为今后欧李在干旱半干旱地区经济林建设中提供理论依据，也可在“一带一路”战略下欧李沙产业的发展中发挥重要作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

实验材料为京欧 1 号实生苗，由北京中医药大学提供。沙藏于中国林业科学研究院沙漠林业实验中心第一实验场。

1.2 试验设计

试验于2016年在中国林业科学研究院沙漠林业实验中心院内实验地进行，选用乌兰布和沙漠地区农田土壤为基质，过筛后等量装入宽口直径×高×底部直径（40 cm× 40 cm×30 cm）的无孔塑料桶，并插入PVC细管用来通气。4月下旬从沙藏中的苗木中选取长势、大小一致的欧李苗移入桶中，实施正常田间管理。采用称重法控制各处理土壤含水量，田间持水量为20.29%。试验共设5个处理，每个处理30桶，正常供水处理（CK）的土壤含水量（SRWC）控制在16%~20%,约占最大田间持水量的80%~100%，胁迫处理分别为田间持水量的60%~80%(T1)，40%~60%(T2)，20%~40%(T3)。隔天早晨8点称重补水，搭建雨棚防止自然降水对试验的影响。在7月至9月每月测定一次生长状况。

1.3 试验方法

植株生长特性测定：株高、冠幅、基茎用游标卡尺测定；

分配指数：将植株主根、侧根及地上部分分解烘干至恒重，计算公式：

分配指数=各器官生物量 / 总生物量；

根冠比：地下生物量/地上生物量；

比叶面积：每个处理选取 50 片植株中上部健康成熟欧李叶片，带回实验室，用扫描仪扫描并得出叶面积、叶长和叶宽数据；之后将叶片杀青 30min，放入 75℃烘箱烘干至叶片恒重，称其干重(W1)。欧李叶片的比叶面积(SLA)计算公式：

SLA = LA / W1

其中，LA：叶片面积(cm^2)；

W1：叶片干重(g)。

1.4数据处理

数据在Excel2003软件进行整理、作图；方差分析通过SAS9.0软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对欧李生物量积累的影响

从表 1 中可以得出，在不同的土壤水分条件下，欧李根生物量、枝叶生物量及植株总生物量等器官均呈现先升高后降低的趋势，由大到小的顺序均为：T1> T2 > CK > T3。各器官在 T1 处理下的生物量积累与对照处理的差值均大于与 T2 的差值，例如水分供应比正常减少 20%（T1）时，根部生物量积累量增加了 6.17 g，方差分析达到显著水平（α=0.05）。枝叶和植株整体生物量积累量在各处理间经过方差分析，结果显示其差异均达到显著性水平（α=0.05）。上述分析说明在水分供应为 60%-80%时最适宜欧李在乌兰布和沙漠地区生长。水分供应在田间持水量的 80%以上和 40%以下均影响欧李的生长和生物量的积累。

表 1 干旱胁迫对欧李叶片生物量积累的影响

Table 1 Effects of Drought Stress on Leaf Biomass Accumulation in Euryale

处理 Treatments	生物量积累 Biomass accumulation(g)		
	根 Root	枝叶 Branches and Leaves	植株 Plants
CK	13.47bc	11.22c	24.69c
T1	19.64a	14.7a	34.34a
T2	15.22b	14.51b	29.73b
T3	9.54c	8.4d	17.94d

注：字母表示各处理间的差异（α=0.05）。

Note：Letters indicate differences between treatments（α=0.05）.

2.2 干旱胁迫对欧李生物量分配的影响

如表 2 所示，随土壤含水量的降低，欧李根的生物量分配指数呈先增加后降低的趋势，在 T1 处理下的根的生物量分配指数最大，由大到小的顺序为 T1> CK > T3 > T2，各处理经方差分析达到显著水平（α=0.05）；欧李枝叶的生物量分配指数与根相反，随土壤含水量的降低呈先降低后增加的趋势，枝叶的生物量分配指数由大到小的顺序为 T2> T3 > CK > T1，各处理经方差分析达到显著水平（α=0.05）。

2.3 干旱胁迫对欧李根冠比及其胁迫指数的影响

根冠比反映植株地上部与地下部的分配比例，是衡量植物生长的重要指标。从表 3 可以看出，欧李根冠比在轻度水分胁迫下最高，与其他胁迫处理差异显著（α=0.05）。T2、T3 处理根冠比较低，是由于水分缺乏限制了地上部的生长。根冠比胁迫指数指胁迫下的根冠比与正常实验组的比值，也用来指示植物生长状况。可从表 3 中得出，60%-80%水分条件下根冠比胁迫指数最大，即根冠比大于 80%-100%条件下的值，说明 T1 水分处理最有利于欧李生长。不同水分处理根冠比差异表明，欧李浇水量适当，根冠比最大，过少或过多的供水均不利于欧李的生长，同时也可能会影响到果实糖分的积累。

表 2 干旱胁迫对欧李生物量分配的影响

Table 2 Effects of drought stress on biomass allocation in eurasian plum

处理 Treatments	生物量分配指数 Biomass allocation index	
	根 Root	枝叶 Branches and Leaves
CK	0.546b	0.454c
T1	0.572a	0.428d
T2	0.512d	0.488a
T3	0.532c	0.468b

注：字母表示各处理间的差异（α=0.05）。

Note：Letters indicate differences between treatments（α=0.05）.

表 3 干旱胁迫对欧李根冠比及其胁迫指数的影响

Table 2 Effects of drought stress on crown ratio and its stress index of euryale

处理 Treatments	根冠比 Root to crown ratio	根冠比胁迫指数 Root to Crown Ratio Stress Index
CK	1.2b	1b
T1	1.336a	1.113a
T2	1.05d	0.875d
T3	1.135c	0.946c

注：字母表示各处理间的差异（α=0.05）。

Note：Letters indicate differences between treatments（α=0.05）.

2.4 干旱胁迫对欧李形态特性的影响

在不同的水分处理下，欧李的生长特性如表4所示。结果表明，正常供水和各程度胁迫对欧李的株高、基茎、二级分枝数、主根直径主根长以及侧根数量的影响趋势相同，均随着水分含量的降低呈先增加后降低的趋势。在不同的水分处理下，欧李株高、二级分枝数、主根直径、主根长以及侧根数量由大到小的顺序均为T1> CK > T3 > T2，冠幅由大到小的顺序为T1> T2>CK > T3。在水分供应为60%~80%时，欧李的株高、冠幅、基径、主根长、主根直径及侧根数量均达到最大值，方差分析达到显著水平（α=0.05），说明T1处理是欧李生长的最适需求量，以此为起点，各生长指标之后随着水分含量的降低而降低，如T2处理下，株高、主根直径、主根长分别降低了15%、16.5%、16.9%，同时说明水分含量的降低抑制了欧李的生长。一级分枝数均为2，处理间无差异，说明水分胁迫对欧李一级分枝数的生长没有显著影响。正常供水和T2处理对基径的影响差异不显著，可能基径的生长只有在达到最适宜的水分供应时会明显增加。

表 4 干旱胁迫对欧李形态特性的影响

Table 4　Effect of drought stress on morphological characteristics of european plum

处理 Treatments	CK	T1	T2	T3
株高/cm Plant height	56.3b	61.5a	53.2c	48d
冠幅/cm Crown width	42.5c	56.6a	45.1b	40.4d
基径/mm Base path	8.56b	10.05a	8.53b	7.54c
一级分枝 Primary branch	2a	2a	2a	2a
二级分枝 Secondary branch	3b	4a	2c	1d
主根长/cm Main root	13.6b	14.8a	12.3c	10.6d
主根直径/cm Main root diameter	8.85b	9.87a	8.24c	7.79d
侧根数量 Number of lateral roots	28b	29a	20c	16d

注：字母表示各处理间的差异（α=0.05）。

Note：Letters indicate differences between treatments（α=0.05）.

2.5 干旱胁迫对欧李叶片生长特性的影响

表 5 干旱胁迫对欧李叶片生长特性的影响

Table 5　Effect of drought stress on the leaf growth characteristics of eurasia plum

处理 Treatments	长 length（cm）	宽/cm width	单叶面积/cm² Single leaf area	比叶面积/m² /g Specific leaf area
CK	5.48a	1.35b	4.86b	1.15b
T1	5.48a	1.39a	5.02a	1.16a
T2	5.07b	1.08c	3.71c	0.94d
T3	4.58c	0.86d	3.48d	1.11 c

注：字母表示各处理间的差异（α=0.05）。

Note：Letters indicate differences between treatments（α=0.05）.

叶片长、宽、面积以及比叶面积均是衡量植物生长的重要指标。表 5 表明，随着水分梯度的下降，叶片宽、单片叶面积及比叶面积均呈先增加后减少的趋势。叶片平均长度在正常供水和轻度胁迫时变化不明显，供水降低到 60%以下时叶片长度逐渐降低，T2 和 T3 两个水平分别降低 7.5%和 16.4%，且方差分析达到显著水平（α=0.05）；叶宽和单叶面积由大到小的顺序一致，均为 T1> CK > T2 > T3，供水量由正常下降 20%时，叶面积增加了 3.2%，再下降 20%时，叶面积降低 26.1%，且方差分析达到显著水平（α=0.05），所以当达到最适

宜生长的供水量时植株生长最旺盛，水分不足时影响植株的正常生长。比叶面积由大到小的顺序为 T1> CK > T3 > T2，方差分析达到显著水平（α=0.05），当水分降低到 T3 处理时，比叶面积又比 T2 时增加了 15.3%，可能由于水分过少导致叶片失水能力下降，积累了干物质，从而增加比叶面积，但总体趋势是水分补充不足，限制了欧李的正常生长发育。

3 讨论

3.1 欧李生长特性的可塑性

植物生存环境对其生长有一定的影响，大量研究结果表明，当植物受到干旱胁迫时，其生长和发育也受到一定程度的影响（谢乾理，2010；尉秋实，2006；郑盛华，2006；陈敏，2013；陈晓远，2004；李清河，2012；李永华，2010；李清河，2008）。生长特征是绿色植物在形态方面对不同环境条件所表现出的反应，旱生植物为了能有效利用生长环境的资源而会确保自身处于最佳生长状态（李丽霞，2002）。在干旱半干旱地区，水分是影响植物生长的重要因子，水分供给量的变化直接影响植物的生长特征、生物量积累及分配等方面，叶片是消耗水分的重要器官，在不同的水分供给条件下叶片的变化是维持植物体内水分平衡的体现，例如植物可能会通过减少受光面积或者提早叶片枯落时间等来抵御干旱和炎热的生活环境（苏培玺，2006）。本实验研究结果表明，随着水分含量的降低，三个胁迫处理与CK相比，欧李的地上枝叶部分、地下根部的生物量的积累和分配、总生物量的积累、根冠比及根冠比胁迫指数均为先升高后降低的趋势，与其他研究结果相同（关保华，2003）。

本研究表明，干旱胁迫显著影响欧李的生物量积累和分配。在T1处理下，欧李各器官的生物量以及总生物量积累达到最大值，之后随着土壤含水量的降低，生物量积累呈下降趋势。当土壤含水量过高或过低时，均会影响欧李的生长，使其生长速率减慢，导致生物量的积累降低。因此从生物量积累的角度分析，在T1处理下最适宜欧李的生长。研究表明，植物在逆境条件或在整个生长发育过程中，会不断调节地上和地下生物量比例来适应和抵御环境变化和不良影响，降低对植物的伤害系数。本实验研究结果表明，在不同的处理下欧李的生物量分配指数出现明显的变化，在T1处理下的根的生物量分配指数最大，枝叶与之相反。说明在干旱胁迫下，植株通过调节自身的适应机制将更多的物质和能量转移至根部来吸收更多的水分和养分，这是植物抗干旱胁迫能力的体现。

植物通过改变其根系的分布来吸收和运输更多的水分，提高保水能力，以便抵御干旱胁迫对其不良的影响，因此根冠比反映了植物对环境因子的竞争能力的大小（陈晓远，2004）。大部分研究结果显示干旱胁迫使植物的根冠比增大，本实验结果显示，随土壤水分的降低，根冠比呈增大减小又增加大的趋势，可能与品种自身的特性差异有关。在不同水分处理下，欧李根冠比胁迫指数有明显变化，趋势等同于根冠比，这也是欧李适应不同水分变化的响应模式。

3.2 欧李形态特性的可塑性影响

在干旱胁迫条件下，植物形态特性的变化可以直接反映其受害状况，也可作为评价植物抗逆性强弱最直接的指标之一（周广，2010）。前人研究表明植株随着干旱胁迫强度的加剧，其高度增长速度减缓。本研究表明，在水分供应为60%~80%时，欧李的株高、冠幅、基径、二级分枝数、主根长、主根直径及侧根数量均达到最大值，说明欧李在不同的水分处理下存在形态上的可塑性差异，在此处理下欧李的表型性状强于其它处理，说明60%-80%的供水量处理是欧李生长的最适宜生态位，这与前人研究结果相似（徐军，2017）。一级分枝数均为2，处理间无差异，说明水分胁迫对欧李一级分枝数的生长没有显著影响。

叶片结构性状表征植物叶片的生化特征，在特定的环境中能够保持相对稳定的状态。当然，叶片性状并不是孤立的，它与其他性状共同适应一定的环境。在干旱半干旱地区，植物为了适应干燥炎热的气候特征，其叶片会表现出一定的适应性，各种性状相互作用而影响植

物的生长发育。叶片长、宽、面积以及比叶面积均是衡量植物生长的重要指标。本研究结果表明，随着水分梯度的下降，叶片长从T2处理开始下降，叶片宽、单片叶面积均呈先增加后减少的趋势。这些变化均反映出欧李对不同干旱胁迫的适应特征。叶长、叶宽及叶面积均减小说明欧李对干旱胁迫有较强的适应能力。比叶面积表示的是单位质量的叶面积，它与植物的生存与生长密切相关。研究表明，比叶面积高的植物同时具有较高生产力的特征，且能够适应当地丰富的资源（李玉霖，2005）。随着干旱胁迫的加剧，叶面积和比叶面积均呈逐渐减小的趋势（王林龙，2015）。本试验研究结果显示，比叶面积在T1处理时达到最大，随后逐渐减小，虽然比叶面积受到干旱胁迫的影响，有增有减，但这些表现均是欧李适应不同水分条件的结果。

4 结论

干旱胁迫条件下，欧李生长特性受到显著影响。随着干旱胁迫的加剧，欧李根生物量、枝叶生物量、植株总生物量积累、根冠比和根冠比胁迫指数均呈现先升高后降低的趋势，在T1 处理下达到最大值，并显著高于其他处理。随土壤含水量的降低，欧李根的生物量分配指数呈先增加后降低的趋势，叶生物量与之相反，在 T1 处理下根的生物量分配指数最大，枝叶的最小。干旱胁迫条件下，欧李形态特性受到显著影响。在水分供应为 60%-80%时，欧李的株高、冠幅、基径、二级分枝数、主根长、主根直径及侧根数量均达到最大值，对一级分枝数的生长没有显著影响。随着水分胁迫的加剧，叶片长从 T2 处理开始下降，叶片宽、单片叶面积及比叶面积均呈先增加后减少的趋势。由上可得，欧李通过调整形态特性、各器官生物量及累及其分配对不同干旱胁迫条件均产生较强的可塑性。

参考文献：

PIGLIUCCI M, 2005. Evolution of phenotypic plasticity: where are we going now?[J]. Trends Eco Evol, 20, 481-486.

SULTAN SE, 2000. Phenotypic plasticity for plant development, function and life history[J]. Trends Plant Sci, 5(12): 537-542.

DE KROON H, HUBER H, STUEFER JF, et al, 2005. A modular concept of phenotypic plasticity in plants[J]. New Phytol, 166(1): 73-82.

ZHU ZH, LIU JX, WANG XA, 2007. Review of phenotypic plasticityand hierarchical selection in clonal plants[J]. J Plant Ecol, 31(4): 588-598.

SCHLICHTING CD, 1986. The evolution of phenotypic plasticity in plants[J]. Ann Rev Ecol Syst, 17: 667-693.

WANG LL, LI QH, XU J, et al, 2015. Effects of drought stress to growth and morphological plasticity of different provenances of *Artemisia ordosica* seedlings [J]. J Northeast For Univ，43(10): 55-57. [王林龙,李清河,徐军，等，2015.干旱胁迫对不同种源油蒿幼苗的生长和形态可塑性的影响[J].东北林业大学学报,43(10):55-57.]

LE Y, 2015. Sthdy on seedling;asticity in *Xanthoceras sorbifolium* Bunge under light stess[D]. Beijing:Beijing Forestry University: 2-10. [乐也,2015.减光胁迫下文冠果幼苗可塑性研究[D].北京林业大学:硕士学位论文:2-10.]

XU J, CHEN HL, LI QH, et al, 2017. Phenotypic plasticity of *Nitraria tangutorum* response to water change[J]. J Northwest For Univ，32(2): 101-105. [徐军,陈海玲,李清河,等,2017.土壤水分含量对白刺幼苗表型可塑性生长的影响[J].西北林学院学报,32（2）：101-105.]

PANG SL, OU ZY, SHEN WH, et al, 2017. Effect of drought stress on phenotypic plasticity of *Excentrodendron hsienmu* seedings[J]. J Central South Univ For & Technol，37(5): 21-25. [庞世龙,欧芷阳,申文辉,等,2017.干旱胁迫对蚬木幼苗表型可塑性的影响[J].中南林业科技大学学报,37(5):21-25.]

WANG YQ, TANG LH, LUO NN, et al, 2016. Effect of simulated precipitation on the phenotypic plasticity of

desert annual plant *Hyalea pulchella*[J]. J Fujian Agric For Univ，45(6): 700-705. [王永秋,汤灵红,罗那那,等,2016.模拟降水增加对荒漠一年生植物琉苞菊表型可塑性的影响[J].福建农林大学学报,45(6):700-705.]

ZHANG G, WEI DD, WU JB, et al, 2014. Difference comparison of content of polyphenol from fruit of *Cerasus humilis*[J]. J Northwest For Univ，29(1): 1-7.[张刚,魏典典,邬佳宝,等,2014. 干旱胁迫下不同种源文冠果幼苗的生理反应及其抗旱性分析[J].西北林学院学报,29(1):1-7.]

ZHU RJ, 2006. A study on germplasm characteristics and anti-drought mechanism of *Prunus humilis*(Bge).Sok.[D]. Hohhot:Inner Mongolia agricultural university: 5-19. [朱荣杰,2006.欧李种质特性及抗旱机理研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学:5-19.]

ZHANG LB, LIU J, 1995. Pollination and Fruiting Biology of E. Li[J]. J Hebei Agrotechnical Teachers Coll， (2), 35-39. [张立彬,刘俊,1995.欧李授粉与结实生物学研究[J].河北科技师范学院学报,(2):35-39.]

LI O, LI WD, HU X, et al, 2010. Different comparison of content of polyphenol from fruit of *Cerasus humilis*[J]. Chin J Experimental Trad Med Formulae, 18(22): 53-56.[李欧,李卫东,胡漩,等,2010.欧李果实多酚含量的差异比较[J].中国实验方剂学杂志,18(22):53-56.]

ZHANG J C, DU J J, LIU H, et al,2011. Molecular cloning, sequence analysis of phytoene synthase gene from *Cerasus humilis* (Bge.) Sok. and its functional expression in e coli[J]. Sci Agric Sin, 44(23): 4848-4857.[张建成,杜俊杰,刘和,等,2011.欧李八氢番茄红素合成酶cDNA 克隆、序列分析及在大肠杆菌中的功能表达[J].中国农业科学,44(23):4848-4857.]

XIE Ql, XIA Xl, LIU C, et al, 2010. Effects of water stress on photosynthetic and growth characteristics of different *Caryopteris mongholica* provenances[J]. For Res, 23(4): 564-573.[谢乾理,夏新莉,刘超,等,2010.水分胁迫对不同种源蒙古莸光合特性与生长的影响[J].林业科学研究,23(4):564-573.]

YU QS, ZHAO M, LI CL, et al, 2006. Growth and biomass allocation of *Chilopsis linearis* under different soil water stresses[J]. Chin J Ecol，25(1): 7-12. [尉秋实,赵明,李昌龙,等,2006.不同土壤水分胁迫下沙漠葳的生长及生物量的分配特征[J].生态学杂志,25(1):7-12.]

ZHENG S H, YAN C R, 2006. The ecophysiological and morphological characteristics of maize in seedling stage under water stress[J]. Acta Ecol Sin, 26(4): 1138-1143. [郑盛华,严昌荣,2006.水分胁迫对玉米苗期生理和形态特性的影响[J].生态学报,26(4):1138-1143.]

CHEN M, 2013. Effects of Soil Drought Stress on the Growth and Physiological and Biochemical Reaction in Fiber Herbaceous Energy Plants [D]. Yaan:Sichuan Agricultural University: 8-19.[陈敏,2013.土壤干旱胁迫对纤维素类草本能源植物生长及生理生化特性的影响[D].雅安:四川农业大学:8-19.]

CHEN X Y, GAO Z H, LIU X Y, et al, 2004. Effects of water stress on root / shoot relation and grain yield in winter wheat[J]. Acta Agron Sin, 7(30), 723-728.[陈晓远,高志红,刘晓英,等,2004.水分胁迫对冬小麦根、冠生长关系及产量的影响[J].作物学报,7(30),723-728.]

LI QH, XIN ZM, GAO TT, et al, 2012. Reproductive allocation in four desert species of the genus Nitraria L.[J]. Acta Ecol Sin，32(16): 5054-5061.[李清河,辛智鸣,高婷婷,等,2012.荒漠植物白刺属 4 个物种的生殖分配比较[J].生态学报,32(16):5054-5061.]

LI YH, LU Q, WU B, et al, 2010. A review of leaf morphology plasticity linked to plant response and adaptation characteristics in arid ecosystems[J]. Chin J Plant Ecol，36(1): 88-98.[李永华,卢琦,吴波,等,2010.干旱区叶片形态特征与植物响应和适应的关系[J].植物生态学报,36(1):88-98.]

LI QH, ZHANG JB, LI HQ, et al, 2008. Response of differences of *Nitraria tangutorhoides* seedlings in photosynthetic physiological and growth characteristics to water gradients[J]. Sci Silv Sin，36(1): 88-98. [李清河,张景波,李慧卿,等,2008.不同种源白刺幼苗生理生长对水分梯度的响应差异[J].林业科学,44(1):52-56.]

LI LX, LIANG ZS, HAN RL, 2002. Effect soil drought on the growth and water use efficiency of seabuckthorn[J]. Northwestern J Bot，22(2): 296-302. [李丽霞,梁宗锁,韩蕊莲,2002.土壤干旱对沙棘苗木生长及水分利用的影响[J].西北植物学报,22(2):296-302.]

SU PX, YAN QD, 2006. Photosynthetic characteristics of C4 desert species Haloxylon ammodendron and *Calligonum mongolicum* under different moisture conditions[J]. Acta Ecol Sin，26(1): 75-82.[苏培玺,严巧娣,2006.C_4荒漠植物梭梭和沙拐枣在不同水分条件下的光合作用特征[J].生态学报,26(1):75-82.]

GUAN BH, GE Y, FAN MY, et al, 2003. Phenotypic plasticity of growth and morphology in *Mosla chinensis* responds to diverse relative soil water conten[J]. Acta Ecol Sin，23(2):259-263.[关保华,葛滢,樊梅英,等,2003.华荠苧响应不同土壤水分的表型可塑性[J].生态学报,23(2):259-263.]

ZHOU G, SUN BT, ZHANG LH, et al, 2010. Responses of antioxidant system in leaves of *rhododendron Jinggangshanicum* to high temperature stress [J]. Acta Bot Boreali-Occidentalia Sin，30(6):1149-1156. [周广,孙宝腾,张乐华,等,2010.井冈山杜鹃叶片抗氧化系统对高温胁迫的响应[J].西北植物学报,30(6):1149-1156.]

LI YL, CUI JY, SU YZ, 2005. Specific leaf area and leaf dry matter content of some plants in different dune habitats[J]. Acta Ecol Sin，25(2): 304-311. [李玉霖,崔建垣,苏永中.不同沙丘生境主要植物比叶面积和叶干物质含量的比较[J].生态学报,2005,25(2):304-311.]

WANG LL, 2015. Influence of drought stress and sand burial tn phenotypic plasticity of desert plant[D]. Beijing: Chinese Academy Forestry，5-16. [王林龙,2015.旱胁迫及沙埋对沙生植物表型可塑性的影响[D].北京:中国林业科学研究院，5-16.]